

多微电网共享储能优化配置与成本分配方法

巨亚琦¹, 谢丽蓉¹, 卞一帆¹, 叶家豪¹, 包洪印²

(1. 新疆大学电气工程学院, 乌鲁木齐 830017; 2. 中船重工海为(新疆)新能源有限公司, 乌鲁木齐 830002)

摘要: 为降低多微电网运行成本, 解决共享储能优化配置及成本公平分摊问题, 提出了主电网分时电价下多微电网共享储能的双层优化配置及改进 Shapley 值法的共享储能公平分配方法。首先, 提出了多微电网共享储能双层优化配置模型, 上层以共享储能等年投资配置成本最小为目标, 下层以含共享储能的多微电网运行成本最小为目标, 求解出共享储能充放电策略和优化配置容量及多微电网运行成本。其次, 基于多微电网体系运行成本最小化所得的涌现收益, 构建了贡献度评估模型。最后, 基于贡献度的改进 Shapley 值法分摊共享储能配置所产生的节省成本。通过算例仿真验证了该方法可为多微电网公平合作提供理论支撑, 有效解决了大电网和微电网互动时成本和效益难以公平分摊的问题, 在多微电网公平协作方面具有实用价值。

关键词: 多微电网; 共享储能; 分时电价; 合作博弈论; 贡献度评估

Optimal Configuration and Cost Allocation Method for Shared Energy Storage of Multi-Microgrids

JU Yaqi¹, XIE Lirong¹, BIAN Yifan¹, YE Jiahao¹, BAO Hongyin²

(1. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China; 2. CSIC Haiwei (Xinjiang) New Energy Co., Ltd., Urumqi 830002, China)

Abstract: To reduce the operational costs of multi-microgrids and address the issues of optimal configuration and fair cost allocation of shared energy storage, a dual-layer optimization configuration for shared energy storage under time-of-use pricing of the main grid and an improved Shapley value method for fair allocation of shared energy storage are proposed. Firstly, a dual-layer optimization configuration model for shared energy storage in multi-microgrids is established. The upper layer aims to minimize the annual investment and configuration costs of shared energy storage, while the lower layer aims to minimize the operational costs of multi-microgrids incorporating shared energy storage. This model determines the charging/discharging strategy of shared energy storage, the optimized configuration capacity, and the operational costs of multi-microgrids. Secondly, based on the emergent benefits derived from minimizing the operational costs of the multi-microgrids system, a contribution evaluation model is constructed. Finally, an improved Shapley value method based on contribution is applied to allocate the cost savings generated by the shared energy storage configuration. Case simulations demonstrate that this method provides theoretical support for fair cooperation among multi-microgrids, effectively resolves the challenge of equitable cost and benefit allocation during interactions between the main grid and microgrids, and holds practical value for fair collaboration among multi-microgrids.

Key words: multi-microgrids; shared energy storage; time-of-use tariffs; cooperative game theory; contribution assessment

0 引言

传统化石能源的短缺和污染制约了经济发展, 而风能、太阳能等新能源的不确定性给微电网运行

带来难题^[1-7]。单个微电网(microgrid, MG)消纳新能源能力有限, 且其分布式电源易受自然条件影响导致能源供应稳定性不足, 因此提出多微电网(multi-microgrids, MMGs)体系, 通过多微电网的

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62463030); 新疆维吾尔自治区自然科学基金重点项目(2024D01D05)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (62463030); the Xinjiang Uygur Autonomous Region Natural Science Foundation Key Project (2024D01D05).

协同调度进一步扩大新能源接纳规模,同时依托多能源组合管理优化能源配置,提升供电可靠性和能源利用率^[8-9]。随着结构调整,需求侧参与调度管理受到关注,管理模式向考虑需求侧的双向调度转变。此外,储能技术能够有效补偿新能源的间歇性,增强电网的吸纳能力。然而,独立建设储能系统的成本较高,这在一定程度上制约了其在高比例新能源微电网中的应用^[10]。通过将相邻的微电网相互连接,形成一个集群系统,并利用内部以及与主电网之间的能量调度,可以显著提高分布式能源的渗透率以及电力供应的可靠性。多个微电网共同建设共享储能(shared energy storage, SES)可以有效降低运行成本以及配置储能的成本。相关研究显示,配置共享储能后微能源网系统运行成本可下降15.01%;同时,多个微电网共享储能设备可按比例分摊储能系统的安装、运营和维护成本,降低单个微电网的投资压力;通过优化调度模型还能进一步降低系统总成本、提升能源利用效率。因此,分析多微电网系统中储能的需求,探讨共享储能资源的有效配置方案,并发展一套既公正又合理的成本分摊机制显得尤为重要^[11]。

目前已有诸多学者针对共享储能系统优化与经济性分析开展了深入研究。文献[12]利用广义纳什议价理论建立了第三方服务下的共享储能成本优化模型,可实现楼宇运行成本降低与储能运营商收益提升的双重目标,但过度依赖单一议价参数,可能忽略其他因素,且实际应用中存在测量和计算偏差。文献[13]提出了一种基于电池寿命和需求响应的混合储能微电网优化配置方法,降低了偏远地区供电成本,但未能充分考虑偏远地区特有的用电模式和需求波动。文献[14]提出了针对综合能源微网接入主动配电网情况下的共享储能多目标优化配置策略,考虑了经济性、电压稳定性和配置容量等目标,但其对电压稳定性的分析深度不足,未充分考量其他影响电压稳定的关键因素。文献[15]提出了一种含共享储能的微电网群分布鲁棒博弈优化调度方法,通过分布鲁棒优化理论和纳什谈判理论,降低了运行成本并保障了信息隐私,但实际应用中需要准确的市场机制和合作协议来支持。文献[16]建立了电-氢混合储能多微网系统框架,提出了运行控制策略和容量优化配置模型,采用灰狼-正弦余弦优化算法求解,验证了该方法的有效性,与电-氢

混合储能的季节性储能优势,但电-氢混合储能系统的集成和维护会面临技术和经济挑战。

在共享储能系统的运营模式设计、定价策略、交易机制等方面也开展了相关研究。文献[17]提出了含共享储能的数据中心微网群运行模型及其运行策略,但高斯混合模型对可再生发电预测误差进行拟合不具有普适性。文献[18]提出了基于主从博弈的多套餐共享储能分布鲁棒定价方法,综合考虑储能调频、寿命损耗和风电不确定性,实现共享储能服务商与独立发电商的收益最大化双赢目标,但是多套餐服务的实施可能需要精细的管理和监测系统。文献[19]提出了一个长期规划模型,用于发电侧的共享储能,该模型考虑了退役动力电池的性能退化特征,但共享储能的长期规划仍需依托精准的市场需求与资源预测。文献[20]提出了一种新型的共享储能联合调频分散交易机制,该机制采用不完全信息共享,但区块链技术的应用可能需要额外的技术和运营成本。文献[21]提出了储能聚合商的新运营模式,该模式在自营和共享电能交易方面提供了创新的方法,但用户对内部电价的接受度可能影响系统的有效性。

综上所述,目前对于多微电网环境下共享储能的配置及其成本分配的合理性问题尚未得到充分研究。鉴于此,本文深入探讨了多微电网系统中共享储能配置及其成本分摊方法的合理性。通过构建双层优化配置模型,实现共享储能容量与微电网运行成本的优化计算。同时,提出了一种公平分摊共享储能配置成本的方法,通过计算不同微电网组合方案下的运行成本和配置成本,以及节省配置成本和涌现效益,从而确定各微电网在共享储能配置中的贡献度,实现成本公平分摊。最后,结合参考资料中多微网相关算例的验证思路,通过具体案例分析验证了所提出方法的有效性,算例结果显示该方法能为多微电网群中共享储能的优化配置及合理成本分配提供科学支持,有助于降低微电网群运营成本、提升运行经济性。

1 含共享储能的多微电网系统架构

含共享储能的多微电网系统架构涵盖主电网、多个微电网和共享储能,如图1所示。MMGs作为主体与主电网和共享储能相连接。当MMGs内部可再生资源无法满足负荷需求时可以通过向主电网购

电和共享储能放电的方式维持MMGs系统平衡。当MMGs内部可再生能源有余时可以通过向主电网售电和共享储能充电的方式消纳弃风弃光。

由于含共享储能的MMGs系统与主电网之间的能量交易还考虑了分时电价,共享储能的功能不仅能消纳弃风弃光的电量,减少新能源场站因弃风弃光产生的惩罚,还能够通过在电价较低的谷时段充电、电价较高的峰时段放电的电价套利方式,减少MMGs购买主电网的电量,从而有效降低MMGs的运行成本。

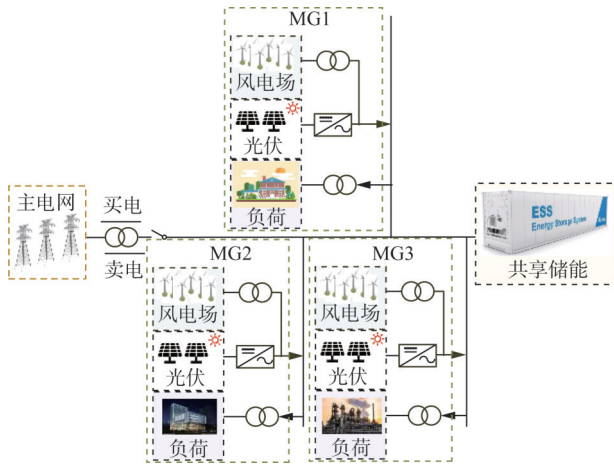


图1 含SES的MMGs系统架构

Fig. 1 System architecture of MMGs with SES

2 多微电网共享储能配置双层优化模型

2.1 上层共享储能容量配置模型

2.1.1 目标函数

上层模型以共享储能的等年投资配置成本 F_1 最小为目标对共享储能的容量配置进行求解。

$$\min F_1 = \frac{r(1+r)^x}{365[(1+r)^x - 1]} (\alpha C_{\text{ses_cap}} + \beta P_{\text{ses_cap}}) \quad (1)$$

式中: $P_{\text{ses_cap}}$ 为共享储能的功率容量; $C_{\text{ses_cap}}$ 为共享储能的储电量; α 、 β 分别为共享储能单位功率和单位储电量容量投资成本; r 为贴现率; x 为共享储能的使用寿命时间。

2.1.2 约束条件

1) 共享储能功率容量、储电量配置约束。

$$0 \leq C_{\text{ses_cap}} \leq C_{\text{ses_cap_max}} \quad (2)$$

$$0 \leq P_{\text{ses_cap}} \leq P_{\text{ses_cap_max}} \quad (3)$$

式中: $C_{\text{ses_cap_max}}$ 为共享储能配置储电量上限; $P_{\text{ses_cap_max}}$ 为共享储能配置功率容量上限。

2) 储能设备约束。

$$\begin{cases} C_{\text{ses},0} = C_{\text{ses},24} = 0.3C_{\text{ses_cap}} \\ 0.1C_{\text{ses_cap}} \leq C_{\text{ses},t} \leq 0.9C_{\text{ses_cap}} \\ C_{\text{ses},t} = C_{\text{ses},t-1} + C_{\text{cha},t} - C_{\text{dis},t} \\ C_{\text{cha},t} = \eta_{\text{cha}}(P_{\text{ses_c},t} + P_{\text{ses_buy},t})\Delta t \\ C_{\text{dis},t} = \frac{1}{\eta_{\text{dis}}}(P_{\text{ses_d},t} + P_{\text{ses_sell},t})\Delta t \end{cases} \quad (4)$$

式中: $C_{\text{ses},0}$ 、 $C_{\text{ses},24}$ 分别为共享储能一个调度周期的始末容量,调度周期的时间尺度为1h; $C_{\text{ses},t}$ 为 t 时刻共享储能的容量状态; η_{cha} 、 η_{dis} 分别为共享储能的充放电效率; $C_{\text{cha},t}$ 、 $C_{\text{dis},t}$ 分别为共享储能 t 时刻充、放电电量; $P_{\text{ses_c},t}$ 为 t 时刻多微电网对共享储能的储电功率; $P_{\text{ses_d},t}$ 为 t 时刻为共享储能对多微电网的供电功率; $P_{\text{ses_buy},t}$ 为 t 时刻共享储能买主电网的电功率; $P_{\text{ses_sell},t}$ 为 t 时刻共享储能卖给主电网功率; Δt 为调度周期的时间尺度,取1h。

3) 储能充放电功率约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{ses_d},t} + P_{\text{ses_sell},t} \leq \delta_{1,t}P_{\text{ses_cap}} \\ 0 \leq P_{\text{ses_c},t} + P_{\text{ses_buy},t} \leq \delta_{2,t}P_{\text{ses_cap}} \\ 0 \leq \delta_{1,t} + \delta_{2,t} \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\delta_{1,t}$ 、 $\delta_{2,t}$ 为0-1变量,表示 t 时刻共享储能运行状态。 $\delta_{1,t}=1$ 时共享储能进行充电; $\delta_{2,t}=1$ 时共享储能进行放电。

2.2 下层多微电网优化运行模型

2.2.1 目标函数

下层模型以含共享储能的多微电网系统日运行成本 F_2 最小为目标进行优化。

$$\min F_2 = F_{\text{new}} + F_{\text{grid}} + F_{\text{ses}} \quad (6)$$

式中: F_{new} 为多微电网新能源发电成本; F_{grid} 为多微电网系统与电网能量交互成本; F_{ses} 为共享储能运行成本。

1) 多微电网新能源发电成本。

$$F_{\text{new}} = \sum_{t=1}^T (\alpha_{\text{wind}} P_{\text{wind},t} + \alpha_{\text{solar}} P_{\text{solar},t}) \quad (7)$$

式中: α_{wind} 、 α_{solar} 分别为风机、光伏发电运行成本系数; $P_{\text{wind},t}$ 、 $P_{\text{solar},t}$ 分别多微电网系统为 t 时刻风机、光伏发电功率; T 为调度周期,为24h。

2) 多微电网系统与电网能量交互成本。

$$F_{\text{grid}} = \sum_{t=1}^T (u_{\text{buy},t} (P_{\text{micro_buy},t} + P_{\text{ses_buy},t}) - u_{\text{sell},t} (P_{\text{micro_sell},t} + P_{\text{ses_sell},t})) \quad (8)$$

式中: $u_{\text{buy},t}$ 为 t 时刻多微电网向主电网买电电价;

$u_{\text{sell},t}$ 为 t 时刻多微电网向主电网卖电电价; $P_{\text{micro_buy},t}$ 为 t 时刻多微电网向主电网买电功率; $P_{\text{micro_sell},t}$ 为 t 时刻多微电网向主电网卖电功率; $P_{\text{ses_buy},t}$ 为 t 时刻共享储能向主电网买电功率; $P_{\text{micro_sell},t}$ 为 t 时刻共享储能向主电网买电功率。

3) 共享储能运行成本。

$$F_{\text{ses}} = \sum_{t=1}^T u_{\text{ses}} (P_{\text{ses_c},t} + P_{\text{ses_buy},t} + P_{\text{ses_d},t} + P_{\text{ses_sell},t}) \quad (9)$$

式中 u_{ses} 为共享储能单位运行成本。

2.2.2 约束条件

1) 多微电网功率平衡。

$$\begin{cases} P_{\text{wind},t} + P_{\text{solar},t} + \delta_{3,t} (P_{\text{micro_buy},t} + P_{\text{ses_d},t}) = \\ P_{\text{load},t} + \delta_{4,t} (P_{\text{ses_c},t} + P_{\text{micro_sell},t}) \\ 0 \leq P_{\text{ses_d},t} \leq \delta_{3,t} P_{\text{ses_cap}} \\ 0 \leq P_{\text{ses_c},t} \leq \delta_{4,t} P_{\text{ses_cap}} \\ 0 \leq P_{\text{micro_buy},t} \leq \delta_{3,t} P_{\text{micro_buy_max}} \\ 0 \leq P_{\text{micro_sell},t} \leq \delta_{4,t} P_{\text{micro_sell_max}} \\ 0 \leq \delta_{3,t} + \delta_{4,t} \leq 1 \end{cases} \quad (10)$$

式中 $\delta_{3,t}$ 、 $\delta_{4,t}$ 为 0-1 变量, 表示多微电网系统运行状态, $\delta_{3,t}=1$ 表示多微电网系统电量缺少; $\delta_{4,t}=1$ 表示多微电网系统电量多余。

3 多微电网共享储能配置成本分摊

3.1 MG 对 MMGs 体系涌现功能贡献度评估

涌现收益指的是在复杂系统或网络中, 由于各组成部分之间的相互作用和协同合作而产生的额外收益^[22]。在由 N 个 MG 组成的 MMGs 系统中, 公平分配涌现收益是确保系统稳定合作的关键。一般采用 Shapley 值法根据 MMGs 的边际贡献度分摊收益。参与者所获收益为其对同盟内微电网贡献度的平均值^[23-24]。本文采用 Shapley 值计算分配给 MG 的涌现收益 Δf_i 。

$$\Delta f_i = \sum_{S \in S_i} \omega_i(|S|) [\Delta f_S - \Delta f_{S \setminus \{i\}}], \forall i \in M \quad (11)$$

$$\omega_i(|S|) = \frac{(N - |S|)! (|S| - 1)!}{N!} \quad (12)$$

式中: $\omega_i(\cdot)$ 为权重因子; $|S|$ 为微电网的数量; Δf_S 为涌现收益; $\Delta f_{S \setminus \{i\}}$ 为去掉微电网 i 后的涌现收益; M 为 MG 集合, $M = \{1, 2, \dots, N\}$; S_i 为包含所有微电网 i 的所有子集。

各 MG 在合作状态下的运行成本低于其独立运行时的成本。合作运行状态下微电网 i 真实运行的

成本为微电网 i 不参与合作状态下的运行成本与合作状态下分配给微电网 i 的涌现收益之差。

$$f_{i, \text{SoS}} = f_i - \Delta f_i \quad (13)$$

式中: f_i 为微电网 i 独立运行的运行成本; $f_{i, \text{SoS}}$ 为微电网 i 参与合作状态下运行成本。

MMGs 贡献度可用微电网涌现收益与总涌现收益的比值表示。对于微电网 i 贡献度 R_i 有:

$$R_i = \frac{f_i - f_{i, \text{SoS}}}{\Delta f} \times 100\% \quad (14)$$

3.2 基于 MG 对系统整体贡献的共享储能节约成本 Shapley 值分摊法

微电网通常由不同的利益相关方运营, 每个微电网在能源的生产和消耗方面都有其独特性, 对共享储能资源的需求亦各有差异。当这些微电网联合起来作为储能共享项目的投资者, 共同出资建设储能设施时, 必须确定一个公平的方法来分配储能系统的建设成本。通过这种集体投资方式, 共享储能的总成本通常低于各个微电网独立承担储能设施建设的成本总和。这种成本节约效应体现了通过多微电网协作进行储能共享的经济效益。本文将基于改进 Shapley 值法, 以共享储能所产生的节省成本为依据, 在多微电网之间分摊共享储能配置成本^[25]。

Shapley 值法是一种用于解决多方合作中利益分配问题的方法, 旨在创建一个平衡各方需求的公平效用分配方案。在参与联合投资、共享储能资源的微电网网络中, 合作所实现的成本降低可视为所有参与方的集体收益。为确保这些节省的成本在各微电网间得到公正分配, 将采用 Shapley 值方法进行合理划分。

第 i 个 MG 在参与 MMGs 系统后, 共有 $(|S| - 1)!$ 种排序, 其中 $|S|$ 为 MMGs 系统所包含的微电网数量, 而剩余 $N - |S|$ 个 MG 的排序有 $(N - |S|)!$ 种, MG_i 参与的不同排序组合除以 N 个 MG 的随机排序组合就是 MG_i 在整个 MMGs 中所应分得利益的权重, 即 $\frac{(|S| - 1)! (N - |S|)!}{N!}$ 。

MG_i 在不同联盟 S 为自身和联盟创造的边际贡献为 $v(S) - v(S \setminus \{i\})$, 则可以计算得到 MG_i 从总体利益中所分得的利益 $\varphi_i(v)$ 如式(15)所示。

$$\varphi_i(v) = \sum_{S \subset X} \frac{(|S| - 1)! (N - |S|)!}{N!} (v(S) - v(S \setminus \{i\})) \quad (15)$$

式中: $X = \{1, 2, \dots, N\}$; $v(S)$ 为 MG_i 参与联盟 S 时整个联盟 S 所产生的利益。

可以得出微电网 MG_i 的新权重与旧权重之差 ΔR_i 为:

$$\Delta R_i = R_i - \frac{1}{N} \quad (16)$$

对于所有微电网的权重之差, 有 $\Delta\varphi_i(v) = \Delta R_i v(S)$ 。

利用 ΔR_i 对常规 Shapley 值法进行改进, 微量 $\Delta\varphi_i(v)$ 为:

$$\Delta\varphi_i(v) = \Delta R_i v(S) \quad (17)$$

则 MG_i 新的分摊结果 $\varphi_i^*(v)$ 为:

$$\varphi_i^*(v) = \varphi_i(v) - \Delta\varphi_i(v) \quad (18)$$

4 优化模型的求解步骤及方法

本研究将优化模型的求解方案划分为两个阶

段, 具体流程详见图 2。

在第一阶段, 利用微电网的典型日负荷和新能源数据, 通过双层优化模型来确定光伏、风电、储能等多电源的容量配置。在这个模型中, 上层以周期内投资成本与运维成本之和最低为目标, 下层则以调度周期内购售电成本以及燃料成本最低为目标。通过差分进化算法、线性规划等方法求解上层的容量配置与下层的运行策略, 可以获得最佳容量配置的成本、各类设备容量、储能的充放电策略、系统的运行成本以及储能的荷电状态。这种双层结构能有效区分全局优化与本地控制的不同需求, 使微电网的能量管理更具针对性和灵活性, 更好适应复杂运行环境。

在第二阶段, 首先基于不同微电网联合方案在下层模型的运行成本, 计算出各个微电网的涌现效益。随后, 采用 Shapley 值法评估各微电网对多微

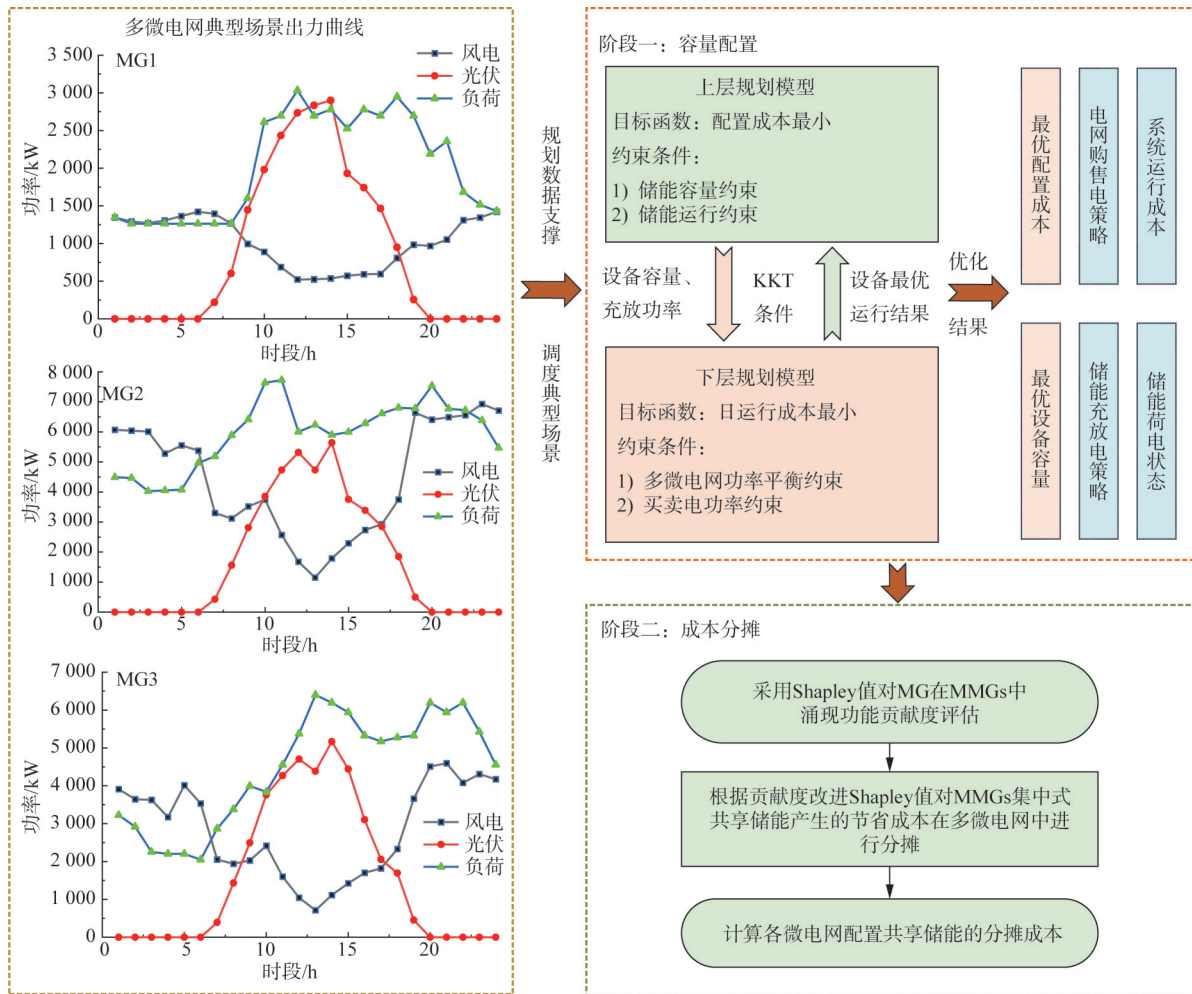


图2 模型求解流程

Fig. 2 Flowchart of model solving

电网系统涌现功能的贡献度,据此确定权重差异,并进一步计算微调量。最后,利用不同微电网联合方案在上层模型的配置成本,计算出节省的配置成本,并使用Shapley值法对节省的共享储能配置成本进行分摊。根据微电网对多微电网系统涌现功能的贡献,对各微电网节省的共享储能配置成本进行适当调整^[26]。

5 案例分析

5.1 算例描述

本文选取某地3个微电网的相关数据开展研究,该地区主电网与多微电网的交易电价数据见表1,多微电网运行参数及共享储能配置参数见表2。

表1 分时电价信息

Tab. 1 Time-of-day tariff information

时段		电价/(元·kWh ⁻¹)	
		购电	售电
峰时段	10:00—15:00	1.21	1.02
	18:00—21:00		
平时段	07:00—10:00	0.69	0.50
	15:00—18:00		
	21:00—23:00		
谷时段	23:00—07:00	0.43	0.27

表2 MMGs运行输入参数

Tab. 2 MMGs operation input parameters

名称	参数
折现率	0.08
储能充放电单位成本/(元·kWh ⁻¹)	0.12
储能使用年限/a	15
单位能量容量成本/(元·kWh ⁻¹)	1 500
单位功率容量成本/(元·kWh ⁻¹)	3 500
充放电效率	0.95
风电运行成本/(元·kWh ⁻¹)	0.15
光伏运行成本/(元·kWh ⁻¹)	0.17
微电网与主电网交易上限/kWh	500

5.2 不同组合方案储能的配置及运行情况

为了更加合理地对地微电网配置集中式共享储能的成本分摊,首先需要计算出不同组合方案下配置储能成本及运行情况。本文通过双层优化模型求解出不同微电网组合方案下的运行成本与配置成本,并根据运行成本和配置成本计算出节省配置成本与涌现效益,计算结果见表3。

从表3中的数据可以看出各种组合方案均有利于微电网之间的联盟。如参考资料中的研究显示,多微电网联合协调并网的发电成本低于单微电网单独并网;实施区域微电网互联后,能源综合利用率可提升15%,运营成本降低20%;山东泰开园区构建微电网联盟后,每年可节省电费600万元,综合能效提升10%^[27],这些都充分证明了微电网联盟的显著优势。在7种不同组合方案下,只有MG2、MG3的联盟形式共享储能节省配置成本减少,但是涌现效益增加,从长期来看此联合方案依然具有可行性。

MG1、MG2、MG3组成的MMGs体系,在本文中将MMGs看作整体,忽略微电网之间内部能量互济过程。图3表示MMGs体系运行状态,图4表示共享储能周期内运行状态。从各地政策与学术研究来看,共享储能与主电网之间进行电量交换,在峰时段进行卖电交易,在谷时段进行买电交易,可有效降低MMGs运行成本。比如河北唐山将工商业用电高峰和低谷时段电价在平段电价基础上上下浮动幅度提升到70%,以此降低新型储能项目购电成本^[28];吉林则规定用户侧储能低谷时段电价按平时段电价下浮55%,进一步拓宽了储能峰谷套利空间^[29]。同时,上海电力大学等机构的研究通过IEEE33节点配电系统算例^[30],验证了考虑微能网接入主动配电网的共享储能配置策略在提升经济性方面的有效性,这也从学术层面佐证了共享储能峰谷交易对降低MMGs运行成本的作用。

5.3 MG对MMGs体系涌现功能的贡献度评估

为了合理分摊多微电网配置共享储能的成本,首先进行MG对MMGs的贡献度评估。将不同组合方案下求解出来的效益利用Shapley值法分配给3个微电网得到其在MMGs下的真实运行成本与涌现收益,进而计算出MG对MMGs体系涌现功能的贡献度、权重差与微调量,计算结果见表4—5。

从表4中可以看出MMGs体系中MG的真实运行成本都小于MG独立运行的成本,更有利于MG实现经济运行。相关研究^[31]显示,可通过综合计算光伏、燃气轮机发电成本及购电、储能成本,动态评估运行经济性,也能通过构建电力价格与多类成本函数生成优化策略,来保障微电网的经济运行,这也进一步验证了MMGs体系在成本控制上的优势。

表 3 各种联合方案下MMGs配置SES节省配置成本与涌现效益

Tab. 3 Configuration cost savings and emerging benefits of MMGs configuration SES under various joint scenarios

联合方案	储能容量/kWh	功率容量/kW	等年配置成本/元	日运行成本/元	节省等年配置成本/元	涌现效益/元
MG1	23 787. 96	3 574. 23	10 571. 71	525 448. 25	0	0
MG2	6 749. 20	1 487. 59	3 362. 99	78 138. 58	0	0
MG3	8 606. 83	1 837. 01	4 242. 52	176 308. 46	0	0
MG1、MG2	8 630. 33	1 897. 74	4 296. 88	119 392. 52	9 637. 82	484 194. 31
MG1、MG3	19 583. 23	2 406. 47	8 291. 55	192 285. 61	6 522. 68	509 471. 10
MG2、MG3	16 687. 73	2 861. 91	7 688. 45	211 810. 58	-82. 94	42 636. 46
MG1、MG2、MG3	22 873. 28	3 536. 87	10 242. 04	243 969. 55	7 935. 17	535 925. 74

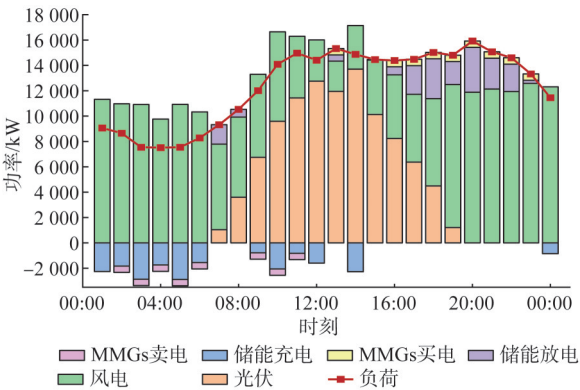


图 3 MMGs运行状态

Fig. 3 MMGs operational status

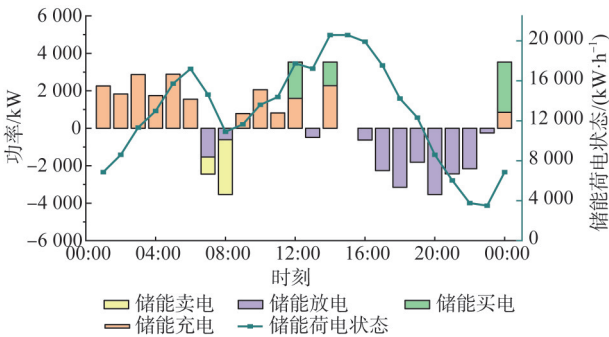


图 4 共享储能运行状态

Fig. 4 Shared energy storage operation status

从表5可以看出MG1对体系涌现功能贡献度最高，以每个MG对体系平均贡献度为1/N来看，计算出MG1、MG2、MG3的权重差分别为29.86%、-15.77%、-14.09%。所以MG1在MMGs体系中比MG2、MG3涌现收益更多。为了鼓励其加入多微电网联盟共同投资共享储能，结合多微电网涌现收益分配常用的Shapley值法，基于涌现收益贡献度这一因素，计算出微调量来提高MG1共享储能的分摊成本，降低MG2和MG3的共享储能的分摊成本，来促进MMGs体系的公平性。

表 4 各微电网独立运行成本、涌现收益及真实运行成本

Tab. 4 Stand-alone operating costs, emergent benefits and true operating costs for each microgrid 元

微电网	独立运行	涌现收益	真实运行成本
MG1	525 448. 25	330 040. 66	195 407. 59
MG2	78 138. 58	96 623. 34	-18 484. 77
MG3	176 308. 46	109 261. 73	67 046. 72

表 5 MG对MMGs中涌现功能贡献度、权重差、微调量

Tab. 5 MG contribution to emergence function in MMGs, weight difference, and amount of fine-tuning

微电网	涌现功能贡献度/%	权重差/%	微调量/元
MG1	63. 19	29. 86	2 241. 68
MG2	17. 57	-15. 77	-1 214. 41
MG3	19. 24	-14. 09	-1 027. 28

5. 4 多微电网共享储能的成本分摊结果

通过不同微电网之间组合方案求解出共享储能的配置成本，考虑MG对MMGs体系中涌现功能的贡献度情况，通过式(18)改进Shapley值法进行公平分摊共享储能配置成本。

采用Shapley值法分配共享储能的节省成本，表6展示了传统Shapley值法与改进Shapley值法的共享储能成本分配对比。结合MG在MMGs中的涌现功能贡献来看，MG1的涌现功能贡献提升了29.86%，MG2和MG3的涌现功能贡献则分别下降了15.77%和14.09%。上述数据表明，MG1在MMGs体系中具备更强运行优势，实现了运行成本的最大幅度节约。因此，为了促进共享储能成本分摊的公平性，使用改进的Shapley值法使MG1分摊的共享储能配置成本较传统Shapley值法有所上升，MG2和MG3分摊的成本则有所下降。

表 6 共享储能配置成本分摊结果

Tab. 6 Allocation results of shared energy storage

configuration costs					元
微电网	节省成本		分摊成本		
	常规 shapley	改进 shapley	常规 shapley	改进 shapley	
	值法	值法	值法	值法	
MG1	5 366.12	3 124.44	5 205.59	7 447.27	
MG2	2 063.31	3 277.72	1 299.68	85.27	
MG3	505.74	1 533.02	3 736.78	2 709.50	

6 结论

本文构建了 MMGs 系统以及双层经济优化模型、贡献度评估模型和共享储能成本分摊模型。以 3 个 MG 组成的小型 MMGs 为例,进行了详细的分析。研究结论如下。

1)通过双层优化模型求解出共享储能最优配置策略、最优运行成本、储能充放电策略、储能购售电策略、微电网购售电策略等信息,该模型外层以全寿命周期净收益最大化为目标,综合考量削峰收益、峰谷套利及运维成本,内层优化日调度周期内充放电策略,同时上层以周期内运维成本以及投资成本之和最低为目标确定最佳容量配置,下层以调度周期内购售电成本以及燃料成本最低为目标制定运行策略,有效改善了 MMGs 体系的经济性。

2)在 MMGs 系统中建立贡献度评估模型,有助于使用 Shapley 值法对系统产生的收益进行合理分配,进而减少微电网运营成本,平衡各方的利益需求,并确定每个微电网对整个 MMGs 系统的贡献程度。

3)在 MMGs 体系中考虑分时电价,共享储能可在谷时电价买电、峰时电价卖电,有利于改善 MMGs 体系的运行经济性。国家发改委发布的《关于进一步完善分时电价机制的通知》明确提出合理拉大峰谷电价价差^[32],为储能发展释放了清晰的价格信号,而当前多地调整分时电价政策,峰谷价差扩大已成为趋势,部分地区将午间时段调整为平/谷时段,还能进一步降低储能充电成本,这让共享储能通过分时电价套利提升 MMGs 体系经济性的作用更为凸显。

4)通过应用调整后的 Shapley 值法,并综合考虑 MG 对 MMGs 系统的个体贡献,对微电网的成本分摊比例进行了优化调整。该策略能够准确计算出

在多个微电网之间实施共享储能所节省的总成本,并为每个微电网分配相应的共享储能成本,从而保证了成本分配的公平性。

参考文献

- [1] 李爽,史翊翔,蔡宁生.面向能源转型的化石能源与可再生能源制氢技术进展[J].清华大学学报(自然科学版),2022,62(4):655-662.
LI Shuang, SHI Yixiang, CAI Ningsheng. Progress in hydrogen production from fossil fuels and renewable energy sources for the green energy revolution [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62 (4): 655 - 662.
- [2] 黄格超,朱童,高剑,等.考虑新能源承载能力的交直流电网鲁棒扩展规划方法[J].高压电器,2025,61(5):268-278.
HUANG Gechao, ZHU Tong, GAO Jian, et al. Robust expansion planning method for AC/DC power grid considering the hosting capacity of renewable energy [J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(5): 268 - 278.
- [3] 傅国斌,孙海斌,王海亭,等.含高渗透率新能源电力系统多目标无功优化方法[J].高压电器,2025,61(5):291-301.
FU Guobin, SUN Haibin, WANG Haiting, et al. Multi-objective reactive power optimization method for new energy power systems with high permeability [J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(5): 291 - 301.
- [4] 白云霄,戴漫茹,季天瑶,等.新型电力系统背景下考虑新能源的现货电能量和调频市场交易机制[J].南方电网技术,2026,20(4):97-108,139.
BAI Yunxiao, DAI Manru, JI Tianyao, et al. Trading mechanism of spot electric energy and frequency regulation markets considering renewable energy under the background of new power system [J]. Southern Power System Technology, 2026, 20 (4): 97 - 108, 139.
- [5] 李岩,仲思为,曹润彬,等.柔直构网的100%新能源基地送出线路的故障特性重塑策略[J].电力系统保护与控制,2026,54(11):1-13.
LI Yan, ZHONG Siwei, CAO Runbin, et al. Fault characteristics reshaping strategy for outgoing lines of 100 % renewable energy bases grid-formed by MMC-HVDC [J]. Power System Protection and Control, 2026, 54(11): 1 - 13.
- [6] 霍子宇,鲁宗相,乔颖,等.100%新能源外送系统日电量-日内功率长短期储能协同规划[J].电力系统保护与控制,2026,54(11):152-162.
HUO Ziyu, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. Coordinated planning of long-and short-duration energy storage for daily energy and intra-day power in 100% renewable energy export systems [J]. Power System Protection and Control, 2026, 54 (11): 152 - 162.
- [7] 永奇,陈龙翔,韩小琪.能源转型下我国新能源替代的关键问题分析[J].中国电机工程学报,2022,42(2):515-524.
LIU Yongqi, CHEN Longxiang, HAN Xiaoqi. The key problem analysis on the alternative new energy under the energy transition [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 515 - 524.
- [8] 桑博,张涛,刘亚杰,等.多微电网能量管理系统研究综述[J].中国电机工程学报,2020,40(10):3077-3093.
SANG Bo, ZHANG Tao, LIU Yajie, et al. Energy manage-

- ment system research of multi-microgrid: a review[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3077 – 3093.
- [9] 吴雄, 王秀丽, 刘世民, 等. 微电网能量管理系统研究综述[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(10): 7 – 14.
WU Xiong, WANG Xiuli, LIU Shimin, et al. Summary of research on microgrid energy management system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10): 7 – 14.
- [10] 马丽, 李伟, 裴玮, 等. 含高比例光伏配电网中计及需求侧响应的混合储能配置优化[J]. 高电压技术, 2024, 50(4): 1416 – 1425.
MA Li, LI Wei, PEI Wei, et al. hybrid energy storage configuration optimization in distribution network with high-proportion PV considering demand response[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(4): 1416 – 1425.
- [11] 李咸善, 解仕杰, 方子健, 等. 多微电网共享储能的优化配置及其成本分摊[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 44 – 51.
LI Xianshan, XIE Shijie, FANG Zijian, et al. Optimal configuration of shared energy storage for multi-microgrid and its cost allocation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 44 – 51.
- [12] 冀瑞强, 胡健, 张晓杰, 等. 基于第三方服务的楼宇集群共享储能成本优化[J]. 高电压技术, 2024, 50(6): 2523 – 2536.
JI Ruiqiang, HU Jian, ZHANG Xiaojie, et al. Cost optimization of shared energy storage in building clusters based on third-party services[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2523 – 2536.
- [13] 杨晓辉, 袁志鑫, 肖锦扬, 等. 考虑电池寿命的混合储能微电网优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 22 – 31.
YANG Xiaohui, YUAN Zhixin, XIAO Jinyang, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage microgrid considering battery life[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 22 – 31.
- [14] 米阳, 陈宇阳, 陈博洋, 等. 考虑微电网接入主动配电网的共享储能多目标配置[J]. 上海交通大学学报, 2024, 58(9): 1309 – 1322.
MI Yang, CHEN Yuyang, CHEN Boyang, et al. Shared energy storage multi-objective allocation strategy considering integrated energy microgrid access to active distribution network[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2024, 58(9): 1309 – 1322.
- [15] 臧云帆, 夏晟, 李嘉文, 等. 含共享储能的微电网群分布鲁棒博弈优化调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 90 – 101.
ZANG Yunfan, XIA Sheng, LI Jiawen, et al. A robust game optimization scheduling method for shared energy storage micro electric network group distribution[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 90 – 101.
- [16] 李蕊睿, 李奇, 蒲雨辰, 等. 计及功率交互约束的含电—氢混合储能的多微电网系统容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 53 – 64.
LI Ruirui, LI Qi, PU Yuchen, et al. Optimal configuration of an electric-hydrogen hybrid energy storage multi-microgrid system considering power interaction constraints[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 53 – 64.
- [17] 王继东, 许秋铭, 黄婷, 等. 含共享储能的数据中心微电网群分布式优化调度[J]. 电网技术, 2024, 48(8): 3238 – 3247.
WANG Jidong, XU Qiuming, HUANG Ting, et al. Distributed optimal scheduling of data center microgrid cluster with shared energy storage[J]. Power System Technology, 2024, 48(8): 3238 – 3247.
- [18] 喻颖倩, 何川, 刘天琪, 等. 计及储能调频与寿命损耗的多套餐共享储能主从博弈分布鲁棒定价方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(4): 1450 – 1465.
YU Yingqian, HE Chuan, LIU Tianqi, et al. Research on robust pricing method of shared energy storage multi-package master-slave game distributed robust considering energy storage frequency modulation and life loss[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(4): 1450 – 1465.
- [19] 李笑竹, 陈来军, 杜锡力, 等. 考虑退役动力电池衰减特性的新能源场站群共享储能长期规划配置[J]. 太阳能学报, 2022, 43(5): 499 – 509.
LI Xiaozhu, CHEN Laijun, DU Xili, et al. Study on long-term planning of shared energy storage at power generation considering attenuation characteristics of retired power batteries[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2022, 43(5): 499 – 509.
- [20] 江昕玥, 吕瑞扬, 何洁, 等. 考虑不完全信息披露的共享储能联合调频分散交易机制[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(18): 68 – 79.
JIANG Xinyue, LÜ Ruiyang, HE Jie, et al. Decentralized trading mechanism for joint frequency regulation of shared energy storage considering incomplete information disclosure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 68 – 79.
- [21] 周天娇, 周任军, 黄婧杰, 等. 储能聚合商自营共享模式下电能交易方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(5): 171 – 176.
ZHOU Tianjiao, ZHOU Renjun, HUANG Jingjie, et al. Energy trading method of energy storage aggregators under self-operating and sharing mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(5): 171 – 176.
- [22] 赵波, 张后谊, 陈民铤, 等. 体系动态架构下的多微电网系统能量管理模型与动态链接行为分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6468 – 6482.
ZHAO Bo, ZHANG Houyi, CHEN Minyou, et al. Energy management model and dynamic link behavior analysis method for multi-microgrid systems under dynamic system of systems architecture[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6468 – 6482.
- [23] 秦海红, 刘天羽, 刘永慧. SoS 架构下多微电网系统经济运行与贡献度评估[J]. 太阳能学报, 2023, 44(12): 518 – 525.
QIN Haihong, LIU Tianyu, LIU Yonghui. Assessment of economic operation and contribution degree of multi-microgrid under system of systems architecture[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2023, 44(12): 518 – 525.
- [24] 张后谊, 赵波, 汪湘晋, 等. 体系架构下的多微电网系统能量管理与贡献度评估[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(13): 4175 – 4187.
ZHANG Houyi, ZHAO Bo, WANG Xiangjin, et al. Energy management and contribution evaluation of multi-microgrid system under system of systems architecture[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(13): 4175 – 4187.
- [25] 胡勋锋, 李登峰. 广义多选择合作博弈的 Shapley 值[J]. 系统工程理论与实践, 2024, 44(8): 2524 – 2531.
HU Xunfeng, LI Dengfeng. A shapley value for multi-choice cooperative games revisited[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2024, 44(8): 2524 – 2531.
- [26] 杨冬峰, 王铁琳, 杨士慧, 等. 基于混合博弈的多微网-共享储能双层能量交易策略[J]. 高电压技术, 2024, 50(4): 1392 – 1402.

- YANG Dongfeng, WANG Yilin, YANG Shihui, et al. Multi-microgrid and shared energy storage two-layer energy trading strategy based on hybrid game[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(4): 1392 – 1402.
- [27] 陈倩, 陈亮亮. 综合能源服务下的微电网投建营一体化探讨[J]. 项目管理技术, 2018, 16(10): 64 – 68.
- Chen Qian, Chen Liangliang. A discussion on the integration of investment, construction and operation in microgrids under integrated energy services [J]. Project Management Technology, 2018, 16(10): 64 – 68.
- [28] 唐山市人民政府办公室. 关于印发《唐山市关于加快推进储能产业发展的若干意见(暂行)(2024年修订版)》的通知: 唐政办字[2024]70号[EB/OL]. (2024 – 11 – 06)[2026 – 08 – 06]. <https://gxt.hebei.gov.cn/main/policy/zxzcdetail?id=dac70291-dcf9-4c38-b052-4f6d31df37df>.
- [29] 吉林省能源局, 吉林省发展和改革委员会, 吉林省工业和信息化厅. 关于印发《关于促进吉林省用户侧储能设施建设的若干措施》的通知: 吉能储能[2024]232号[EB/OL]. (2024 – 09 – 11)[2026 – 08 – 06]. https://nyj.jl.gov.cn/zwgk/tzgg/202409/t20240911_3296421.html.
- [30] 米阳, 陈宇阳, 陈博洋, 等. 考虑微电网接入主动配电网的共享储能多目标配置[J]. 上海交通大学学报, 2024, 58(9): 1309 – 1322.
- Mi Yang, Chen Yuyang, Chen Boyang, et al. Multi-objective allocation of shared energy storage in active distribution networks considering microgrid integration [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2024, 58(9): 1309 – 1322.
- [31] 方梓康. 考虑柔性互动的“源-网-荷-储”协同运行优化技术及状态评估方法研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2024.
- [32] 李建林, 姜冶蓉, 方知进. “双碳”战略下储能利好政策解析[J]. 电气时代, 2021(9): 8 – 10.
- Li Jianlin, Jiang Yerong, Fang Zhijin. Analysis of favourable policies for energy storage under the “Dual Carbon” strategy [J]. Electrical Times, 2021(9): 8 – 10.

收稿日期: 2024-09-30; 网络首发日期: 2024-12-06

作者简介:

巨亚琦(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网优化调度, juyaqi1998@outlook.com;

谢丽蓉(1969), 女, 通信作者, 教授, 博士, 研究方向为控制系统优化、新能源发电技术、负荷预测, xielirong@xju.edu.cn;

卞一帆(1998), 女, 博士研究生, 研究方向为微电网优化调度、共享储能, byfxju@163.com.

(上接第 113 页 Continued from Page 113)

- GONG Jiahao, TANG Wenhui, LAN Haijuan, et al. Temperature field reduced-order model of SCB11-800/10 dry type transformer based on proper orthogonal decomposition and its overload insulation thermal security assessment[J]. Guangdong Electric Power, 2025, 38(7): 86 – 98.
- [28] 廖才波, 阮江军, 刘超, 等. 油浸式变压器三维电磁-流体-温度场耦合分析方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 150 – 155.
- LIAO Caibo, RUAN Jiangjun, LIU Chao, et al. Comprehensive analysis of 3-D electromagnetic-fluid-thermal fields of oil-immersed transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9): 150-155.
- [29] 邓永清, 阮江军, 龚宇佳, 等. 基于参数热等效的10kV变压器温度流体场三维仿真计算[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 212 – 218.
- DENG Yongqing, RUAN Jiangjun, GONG Yujia, et al. Three dimensional thermal fluid field simulation of 10 kV transformer based on parameter thermal equivalence [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 212 – 218.
- [30] 刘菊. 固体界面接触热阻及导热系数测量的实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [31] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电力变压器 第2部分: 液浸式变压器的温升: GB 1094. 2 – 2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.

收稿日期: 2024-09-08; 网络首发日期: 2024-12-30

作者简介:

刘振邦(1999), 男, 硕士研究生, 从事变压器多物理场计算研究, 1229026437@qq.com;

杜志叶(1974), 男, 通信作者, 教授, 博士, 研究方向为多物理场耦合仿真计算、电力系统电磁环境、特高压直流关键技术, duzhiye@163.com;

黎鹏(1989), 男, 副教授, 博士, 研究方向为电力设备智能运维、电工装备多物理场分析, lipeng_ctgu@163.com.